Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
48(186):25-37, enero-marzo de 2024. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.2190

Ciencias Físicas

Artículo original

Estudio del índice de radiación ultravioleta en la zona Centro Occidente de México, su asociación con el riesgo de cáncer de piel y propuesta tecnológica para la difusión y prevención del riesgo

Study of the ultraviolet radiation index in the Central Western area of Mexico, its association with the risk of skin cancer, and a technological proposal for the dissemination of the problem and its prevention

Gustavo A. López-Saldaña[1], José L. Cendejas-Valdez[2,*], J. Leonardo Soto-Sumuano[3], Ma. Elena Benítez-Ramírez[2]

[1] Posgrado en Tecnologías de la Información y Comunicación, Universidad Tecnológica de Morelia, Morelia, Michoacán, México
[2] CA TRATEC–Programa para el Desarrollo Profesional Docente-PRODEP, Posgrado en Tecnologías de la Información y Comunicación, Universidad Tecnológica de Morelia, Morelia, Michoacán, México
[3] Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas-CUCEA, CA TIC–PRODEP, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México

Citación: López-Saldaña GA, Cendejas-Valdez JL, Soto-Sumuano JL, *et al*. Estudio del índice de radiación ultravioleta en la zona Centro Occidente de México, su asociación con el riesgo de cáncer de piel y propuesta tecnológica para la difusión y prevención del riesgo. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 48(186):25-37, enero-marzo de 2024. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.2190

Editor: Gabriel Tellez

***Correspondencia:**
José Luis Cendejas-Valdez;
luis.cendejas@utmorelia.edu.mx

Recibido: 19 de noviembre de 2023
Aceptado: 20 de febrero de 2024
Publicado en línea: 22 de marzo de 2024

Este artículo está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-Compartir Igual 4.0 Internacional

Resumen

En el 2012 la Organización Mundial de la Salud (OMS) clasificó la radiación ultravioleta (*ultraviolet radiation*, UVR) como carcinógeno del grupo 1, ello porque existen pruebas suficientes para considerarla causa de cáncer en el ser humano. Presentamos aquí los resultados de nuestro estudio sobre la UVR en la zona Centro Occidente de México y su asociación con el riesgo de cáncer de piel, así como la propuesta de una solución tecnológica que contribuya a la difusión de este problema y ofrezca recomendaciones para su prevención. Con este objetivo, se midió y se clasificó la radiación solar ultravioleta durante un año para, posteriormente, investigar y analizar el incremento de cáncer de piel asociado a la UVR. Los resultados fueron los siguientes: a) la presencia de niveles "muy altos" de radiación ultravioleta según el índice de UVR, con un promedio anual en el 2022 de 9,0, y de 10,7 en el cuatrimestre con mayor radiación; b) la causa de uno de cada tres casos de melanoma (un tipo de cáncer de piel) en México es la exposición a la UVR; c) las fuentes secundarias evidenciaron un incremento en los casos de melanoma en México, y d) la propuesta y desarrollo de una App para la divulgación, prevención y reducción del riesgo. El trabajo se ajustó a los Objetivos de Desarrollo Sostenible 3.4 y 3.d planteados en la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU).

Palabras clave: Índice de radiación ultravioleta (IUV); Cáncer de piel; Agenda 2030; Aplicación móvil; Rayos UV.

Abstract

In 2012, the World Health Organization (WHO) classified ultraviolet radiation (UVR) as a group 1 carcinogen, which means there is sufficient evidence that it can cause cancer in humans. Here we show the results of our study on UVR in the Central Western zone of Mexico and its association with the risk of skin cancer; besides, we propose a technological solution for the diffusion of this problem with recommendations for its prevention. For this, we measured and classified solar ultraviolet radiation for a year to subsequently investigate and analyze the increase in skin cancer associated with UVR. These were our results: a) we found "very high" levels of ultraviolet radiation according to the UV index, with an annual average of 9.0, and 10.7 in the four months with the highest radiation;

b) one out of three cases of melanoma (a type of skin cancer) in Mexico is caused by UVR exposure; c) secondary sources showed an increase in cases of skin melanoma in Mexico, and d) a proposal and the development of an App for the dissemination, prevention, and risk reduction. Our study is aligned with the Objectives of Sustainable Development 3.4 and 3.d set by the United Nations (UN) 2030 Agenda.

Keywords: Ultraviolet radiation index (UVI); Skin cancer; 2030 Agenda; Mobile application; UV rays.

Introducción

Desde 1970 la comunidad científica obtuvo evidencias de que la capa de ozono estaba reduciéndose. **Molina & Rowland** (1974) y **Crutzen** (1974) alertaron sobre este hecho en su estudio de los efectos del CFC-11 y su impacto en la capa de ozono. Una vez que las imágenes de satélite divulgadas por la National Aeronautics and Space Administration (NASA) confirmaron el hueco de ozono en la Antártida, se declaró una emergencia mundial que desembocó en la adopción de programas para detener la disminución del ozono. A pesar de ello, la UVR ha seguido en aumento, alcanzando la superficie terrestre (**Solomon**, 1999; **Dahlback**, 2002), lo que aumenta la sobreexposición y los problemas de salud asociados, con el consiguiente incremento de la incidencia de enfermedades cutáneas como el cáncer de piel (**International Agency for Research on Cancer [IARC]**, 2017). En los Estados Unidos se diagnostican más de 9.500 casos de cáncer de piel diariamente y más de dos personas mueren cada hora a causa de esta enfermedad (**Rogers *et al.***, 2015; **American Cancer Society**, 2023; **Mansouri & Housewright**, 2017). En México la tasa de mortalidad general por melanoma aumentó un 78 % entre 1998 y 2016, siendo los individuos de sexo masculino del grupo de edad de 60 años y más los más afectados (**Hernández *et al.***, 2019), en tanto que en Colombia se estimaron 1.805 casos de melanoma de piel y 490 muertes por esta causa en el 2020 (**IARC**, 2017).

Para facilitar la comprensión del problema, la agencia Environment Canada (EC) creó el índice de radiación ultravioleta (IUV) que ofrece información de cuán intensa y dañina es la UVR en un área. Posteriormente, en el 2012, la OMS clasificó la UVR como un carcinógeno del grupo 1 (**IARC**, 2012), confirmando su peligrosidad con base en pruebas suficientes para clasificarla como causa de cáncer.

El IUV en la superficie terrestre es un indicador que representa la capacidad de producir lesiones cutáneas en la población y ha servido como medio para hacer conciencia y advertir a las personas de la necesidad de adoptar medidas de protección cuando se exponen a la UVR. El IUV ha sido adoptado internacionalmente por la OMS, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Organización Meteorológica Mundial (OMM), la Comisión Internacional sobre Protección contra la Radiación no Ionizante (ICNIRP) y la Oficina Federal Alemana para la Protección contra la Radiación (Bundesamt für Strahlenschutz, BfS).

Presentamos aquí los resultados del estudio sobre el IUV en la zona Centro Occidente de México, así como su asociación con el riesgo de cáncer de piel y proponemos una solución tecnológica que contribuya a la difusión de este problema y de las recomendaciones para prevenirlo. Las etapas del estudio fueron las siguientes: a) determinación de los antecedentes y el objetivo de la investigación; b) obtención y extracción de la información sobre las mediciones de la UVR en la Unidad Meteorológica de la Universidad Tecnológica de Morelia (UM-UTM) durante el 2022; c) la estimación de casos de melanoma y su fracción atribuible poblacional (*population attributable fraction*, PAF); d) desarrollo de la aplicación móvil con datos de la UM-UTM; f) resultados, y g) conclusiones.

Antecedentes

La energía que sostiene y da vida a la Tierra proviene del Sol en forma de radiación electromagnética. Esta es una forma de energía producida por la oscilación o la aceleración de la carga eléctrica emitida por todos los objetos cuya temperatura es superior al cero

absoluto (**Hartmann**, 2015), la cual viaja en el vacío a la velocidad de la luz. La radiación de interés está dentro del rango de longitud de onda que va de 0,1 µm a 100 µm (**Robinson & Henderson-Sellers**, 2014). Dentro de esta región, el ojo humano responde a una muy pequeña porción, conocida como luz visible (**Figura 1**), que está dentro del rango de 400 a 800 nm y corresponde al 99 % de la energía emitida por el Sol, 9 % de la cual es ultravioleta, 49 % visible y 42 % infrarroja (**Peixoto & Oort**, 1992). La región UV abarca el intervalo de longitudes de onda de 100 a 400 nm y se divide en tres categorías: 1) la UV-C, de 100 a 280 nm; 2) la UV-B, de 280 a 315 nm, y 3) la UV-A, de 315 a 400 nm (**Figura 1**). Cuanto más corta sea la longitud de onda de la UVR, más dañina es desde el punto de vista biológico (UV-C) (**Benavides**, 2010). Como se observa en la **figura 1** (color violeta), la radiación ultravioleta se encuentra localizada en los límites definidos como radiación ionizante y no ionizante; afortunadamente, gracias a la capa de ozono contamos con un filtro importante que reduce la llegada directa de los rayos UV a la Tierra. Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera, el componente ultravioleta contiene aproximadamente un 95 % de UV-A y un 5 % de UV-B; los rayos UV-C se eliminan de la radiación extraterrestre debido al ozono estratosférico (**IARC**, 2013). El ozono es la combinación de tres átomos de oxígeno y se convierte en un gas que se produce naturalmente en la estratósfera (**Chadyšienė *et al.*,** 2005).

La exposición a la luz solar, específicamente a la UVR, tiene efectos positivos y negativos para la salud (**Lucas *et al.***, 2014). La exposición solar excesiva ha sido motivo de mayor preocupación, debido a sus efectos adversos en los seres humanos, los ecosistemas terrestres y acuáticos, los materiales y la calidad del aire (**Delic *et al.*,** 2017). La intensidad de los rayos UV de la luz solar depende de diversos factores ambientales (**Tabla 1**).

Índice UV (IUV)

En 1992 la EC creó el programa de medición del IUV, cuyo objetivo era brindar información sobre la radiación generada por los rayos UV en los rangos de 250 a 400 nm utilizando un indicador fácil de entender que cuantificara los niveles de UVR esperados para el día siguiente (**He *et al.***, 2013). El índice se basa en el grado en que la radiación solar interacciona con la piel para producir quemaduras o eritemas; se define y se sustituye utilizando la ecuación 1 (**Organización Internacional de Normalización [ISO]**, 1999).

$$I_{UV} = k_{er} \cdot \int_{250nm}^{400nm} E_{\lambda} \cdot s_{er}(\lambda) d\lambda \quad (1),$$

donde Eλ es la irradiancia espectral solar (medida del espectro solar transmitido a través de la atmósfera), expresada en W/(m2.nm), $s_{er}(\lambda)$, el espectro de acción de referencia para el eritema y k_{er}, una constante igual a $40m^2/W$.

El índice es adimensional y se expresa como un valor superior a cero; cuánto más alto, mayor es la probabilidad de lesiones cutáneas y oculares y menor el tiempo que tardan en producirse las lesiones (**WHO *et al.***, 2002) (**Tabla 2**). Para medir la radiación

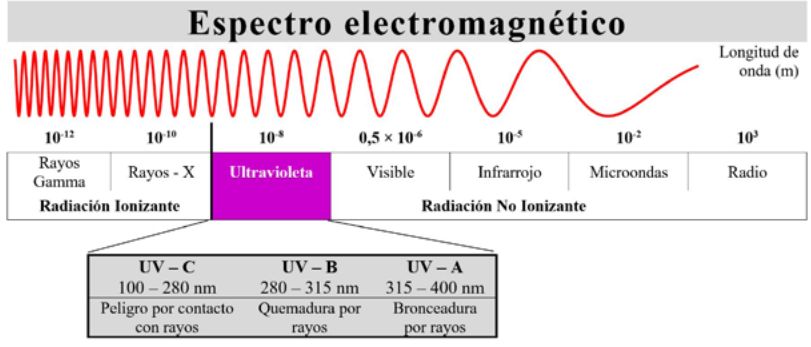


Figura 1. Diagrama del espectro electromagnético que muestra los tipos y longitudes de onda

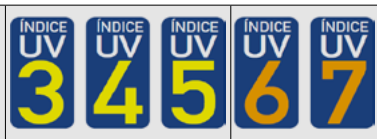
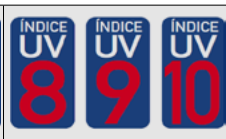
Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
48(186):25-37, enero-marzo de 2024. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.2190

Tabla 1. Factores ambientales que inciden en los rayos UV

Posición del sol: cuanto más alta sea la posición del sol, mayor será la UVR. Por otra parte, la incidencia de la luz solar varía con las estaciones, así que la intensidad de los rayos UV depende de la hora del día y del mes del año.
Latitud: a mayor proximidad con el ecuador terrestre, mayor radiación.
Altitud: al aumentar la altitud, la atmósfera se vuelve más ligera y absorbe menos rayos UV. La intensidad de la radiación aumenta entre 10 y 12 % por cada mil metros de altitud.
Nubosidad: aunque la intensidad de la radiación es máxima cuando el cielo está despejado, puede aumentar en días nublados debido a la reflexión de las partículas finas de agua.
Capa de ozono: absorbe parte de la radiación ultravioleta que llega a la superficie de la Tierra. La concentración de ozono varía a lo largo del año e incluso en el mismo día.
Reflexión del suelo: las diferentes superficies reflejan y dispersan la radiación ultravioleta de distinta manera. Por ejemplo, la nieve reciente puede reflejar hasta un 80 % mientras que la arena seca de una playa refleja hasta un 15 % y la espuma del agua de mar, alrededor de 25 %.

Nota. Adaptado de Índice UV Solar mundial: Guía práctica (**World Health Organization [WHO] *et al.*** (2002)

Tabla 2. Escala del IUV

			
Baja	Moderada	Alta	Muy Alta	Extremadamente alta
No necesita protección	**Necesita protección**		**Necesita protección extra**
Puede permanecer en el exterior sin riesgo	• Manténgase a la sombra durante las horas centrales del día • Póngase camisa, crema de protección solar y sombrero		• Evite salir durante las horas centrales del día • Busque la sombra • Son imprescindibles camisa, crema de protección solar y sombrero

Nota. Adaptado de Índice UV Solar mundial: Guía práctica (**World Health Organization [WHO] *et al.***, 2002)

solar y el ozono en la región UV del espectro, la EC recomienda el espectrofotómetro de ozono Brewer de tercera generación (Mark III), la cual es significativamente superior a las otras generaciones (**Cracknell & Varotsos**, 2012). El IUV ahora está en uso operativo en más de 100 países en todo el mundo y ha sido establecido como el programa estándar de concientización pública sobre la UVR por la OMM y la OMS (**WHO *et al.***, 2002). Según la Secretaría de Salud, en México la exposición a los rayos UV continúa siendo un problema y se espera que el cáncer de piel cause aproximadamente 1,300 casos al año (**Secretaría de Salud**, 2015). El IUV se clasifica en cinco categorías de exposición, las cuales son: 1) baja; 2) moderada; 3) alta; 4) muy alta; 5) extremadamente alta. La **Tabla 2** representa la relación entre el IUV, el riesgo de daño y la recomendación de protección contra el sol sugerida, (**WHO *et a*l.**, 2002).

Enfermedades de la piel ocasionadas por la UVR

Las personas se exponen a los rayos del sol en los momentos de recreación y deporte, cuando se broncean o en el trabajo, entre otros. Cualquiera de estas exposiciones lleva consigo un menor o mayor grado de riesgo de contraer alguna enfermedad en la piel. Los efectos biológicos de la exposición solar son diversos y dependen de su longitud de onda, penetración en la piel y tiempo de exposición, por lo que pueden aparecer años

más tarde. A corto plazo se destacan el eritema, la quemadura solar, la fotodermatosis y la inmunosupresión (**Duro *et al.***, 2003), y a largo plazo, la fotocarcinogénesis y el fotoenvejecimiento. Los efectos de estas enfermedades se presentan en la **tabla 3**.

Según las estadísticas de la International Agency for Research on Cancer (IARC), el cáncer de piel está aumentando de una forma preocupante en todo el mundo, con más de 230.000 nuevos casos y 55.000 muertes estimadas en el 2012 a nivel mundial (**IARC**, 2017); el 87% de todos los nuevos casos ocurren en Europa, América del Norte y Oceanía. En Estados Unidos las tasas anuales de incidencia de melanoma de piel aumentaron en un 2 % entre el 2006 y el 2015 en hombres y mujeres (**Islami *et al.***, 2020).

Como lo señalan **Duro *et al.*** (2003), aunque se desconoce el mecanismo exacto que acciona la actividad tumorígena, se sabe que las exposiciones solares acumuladas a lo largo de la vida, así como las cortas pero intensas, incrementan el riesgo de cáncer cutáneo, particularmente si la exposición es suficiente para causar una quemadura solar y, sobre todo, si ocurre en la infancia.

Según **Arnold *et al.*** (2018), las personas tienen incorporada en su piel una protección natural contra la luz UV que les permite evitar los trastornos cutáneos que causa. Los principales mecanismos de protección naturales o endógenos actúan de dos formas: absorbiendo la radiación o desviándola. La melanina constituye el factor de protección endógeno más importante de la piel. Actúa absorbiendo la radiación con longitudes de onda entre los 350 y los 1.200 nm; la exposición solar estimula su producción y ello se traduce en bronceado. No todas las personas toleran los efectos dañinos de los rayos UV. Ante una misma exposición solar, la respuesta de la piel muestra una enorme variabilidad en la población.

Tabla 3. Enfermedades ocasionadas por los rayos UV

Enfermedad	Efectos
El eritema solar	Es una respuesta inflamatoria de la piel que aparece a las pocas horas de la exposición solar y alcanza su máxima intensidad entre 12 y 24 horas después. En casos extremos de exposición puede convertirse en una quemadura solar de primer o segundo grado superficial, con formación de ampollas. Este tipo de reacción se utiliza como sistema de medida del efecto biológico de los rayos UV.
La inmunosupresión	Es inducida por los rayos UV-B y en menor medida por los UV-A como consecuencia de la alteración morfológica y funcional de las células de Langerhans epidérmicas.
La fotodermatosis	Es un término que engloba un conjunto de enfermedades cutáneas producidas o desencadenadas por la exposición solar, fundamentalmente los UV-A.
El fotoenvejecimiento o envejecimiento cutáneo extrínseco	Se caracteriza por una piel áspera, seca y apergaminada, sin elasticidad, con arrugas profundas y gruesas, telangiectasias, lentigos y alteraciones de la pigmentación. Aparece como consecuencia de exposiciones repetidas y prolongadas al sol, sobre todo radiación UV-A. Las zonas expuestas son las más afectadas: cara, cuello, escote, nuca y dorso de manos. Su intensidad depende del tipo de piel y la dosis total de radiación acumulada a lo largo de la vida.
La fotocarcinogénesis	Es la inducción de lesiones precancerosas y cáncer de piel por efecto de la exposición al sol. Es conocida a partir de datos epidemiológicos procedentes de estudios de casos, controles y estudios de correlación geográfica.

Nota. Adaptado de Skin cancer, including related pathways and therapy and the role of luteolin derivatives as potential therapeutics (**Juszczak *et al.***, 2022)

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
48(186):25-37, enero-marzo de 2024. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.2190

Cáncer de piel atribuible a la UVR

En el 2012 la OMS, a través de la IARC, clasificó la UVR como un carcinógeno del grupo 1. Otros carcinógenos conocidos del grupo 1 son el plutonio, el amianto y la radiación ionizante (**IARC**, 2012). La exposición a la UVR es el factor de riesgo más importante para los cánceres de piel (melanoma y no melanoma); se sabe que induce mutaciones carcinogénicas y elimina elementos del sistema inmunológico, por lo que se ha convertido en el principal factor causante de cáncer de piel (**Arnold *et al.***, 2018). Además, los cambios climáticos actuales y la reducción de la capa de ozono desde 1970 debida a la fotodisociación de los clorofluorometanos en la estratósfera (**Molina & Rowland** (1974), conducen a una filtración disminuida de la radiación UV-A y UV-B y un aumento de la UVR que alcanza el nivel del mar. Sin embargo, gracias a las medidas adoptadas en el marco del Protocolo de Montreal, las sustancias que agotan la capa de ozono (SAO) han disminuido, por lo que se está progresando en la recuperación de la capa de ozono estratosférico. Se espera que la columna total de ozono regrese a los valores de 1980 para el 2066 en la Antártida (**World Meteorological Organization [WMO]**, 2022).

Fracción atribuible poblacional (PAF) de la UVR

La PAF es el porcentaje de casos de una enfermedad que puede evitarse en la población si se suprime la exposición al factor de riesgo (**Porta**, 2008). Esta se expresa mediante la Ecuación 2:

$$PAF = \frac{Tasa\ de\ incidencia\ en\ la\ población\ total - Tasa\ de\ incidencia\ no\ expuesta}{Tasa\ de\ incidencia\ en\ la\ población\ total} \quad (2).$$

En lo que a la UVR concierne, el PAF corresponde a una medida de impacto que estima la carga de enfermedad atribuible en la población asumiendo la causalidad de la UVR en el cáncer de piel. Se puede asumir la causalidad debido a que la categoría de agentes del grupo 1 de la IARC se aplica cuando existen pruebas suficientes de carcinogenia en humanos. En la **figura 2** se muestra a manera de guía la clasificación referente a los carcinógenos.

La carga de enfermedad permite estimar las pérdidas en salud a través de la comprobación de todas las causas de muerte, y aporta un indicador compuesto que integra los daños provocados por la muerte prematura y los daños por vivir enfermo y discapacitado con diferentes niveles de gravedad de una o varias enfermedades a la vez (**Gómez**, 2021). La cuantificación de la carga de enfermedad del cáncer atribuible a la exposición a la UVR, es importante para la planificación del control del cáncer y clarifica el impacto de las acciones destinadas a reducir la exposición. Hasta la fecha, pocos estudios han estimado el PAF para la UVR en México.

Figura 2. Clasificación de los carcinógenos según la IARC

Un estudio del Reino Unido informó que el 86 % de todos los casos de melanoma, equivalente al 3,5 % de todos los nuevos casos de cáncer, eran atribuibles a la exposición a la UVR (**Parkin *et al.***, 2011), en tanto que en dos estudios australianos, más del 95 % de los casos de melanoma se debía a los altos niveles ambientales de exposición a la UVR (**Olsen *et al.***, 2015). Un reciente análisis realizado en Cali, Colombia, concluyó que el 62 % de todos los melanomas en hombres y el 19 % en las mujeres eran atribuibles a la exposición a la UVR (**de Vries *et al.***, 2017). En la **figura 3** muestra una gráfica los casos de melanoma atribuibles a la UVR en el mundo (**Arnold *et al.***, 2018).

Según **Arnold *et al.*** (2018), las poblaciones de piel oscura y pigmentadas se caracterizan por tener tasas de incidencia de melanoma muy bajas, lo que constituye una buena referencia para cuantificar el exceso de carga de melanoma debido a la UVR en otras poblaciones. Estos hallazgos subrayan la necesidad de una acción de salud pública, una mayor conciencia sobre el melanoma y sus factores de riesgo, así como la necesidad de promover cambios en el comportamiento que disminuyan la exposición al sol en todas las edades.

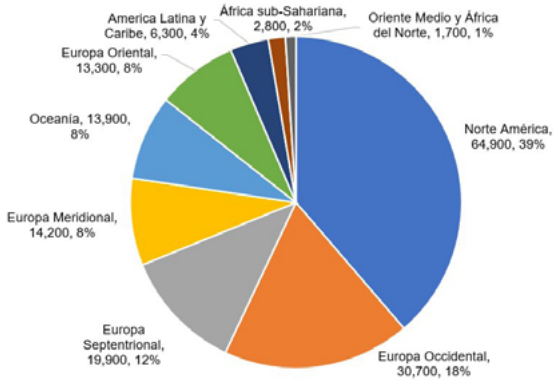


Figura 3. Casos de melanoma atribuibles a la radiación ultravioleta en el 2012 por región del mundo

Materiales y métodos

Se definieron las bases y el alcance del estudio, el cual se fundamentó en diferentes enfoques: experimental, exploratorio, descriptivo y correlacional (**Khotari**, 2004). Se definieron, asimismo, un conjunto de etapas (**Figura 4**).

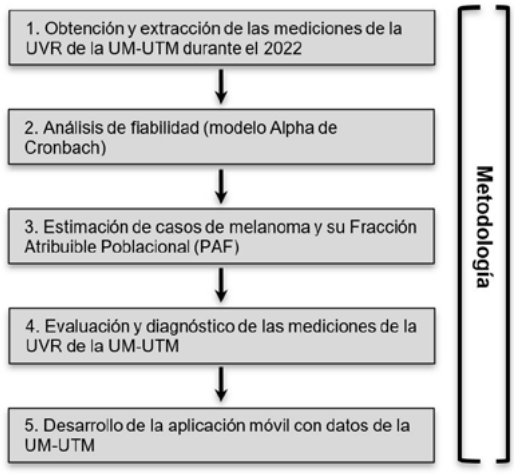


Figura 4. Modelo metodológico del estudio

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
48(186):25-37, enero-marzo de 2024. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.2190

Obtención y extracción de las mediciones de la UVR hechas en la UM-UTM durante el 2022

La estación meteorológica de la UM-UTM cuenta con un sensor de UVR de fotodiodo de silicio sellado herméticamente (tecnología similar a la utilizada en los paneles solares), que mide la irradiancia UV solar global (la suma de los componentes de la UVR solar transmitida directamente y la dispersión en la atmósfera). Las lecturas obtenidas se almacenan localmente así: IUV, dosis de UV y UV máxima. Por medio de un registrador de datos (*datalogger*) de la misma estación, la información se estructura en una base de datos permanente para poder visualizarla en tiempo real, publicarla en Internet y exportarla.

Análisis de fiabilidad

Una vez determinado el problema generado por los rayos UV y el daño en el ser humano, se midió esta variable meteorológica en la UM-UTM y las lecturas del IUV se almacenaron como conjunto de datos (*dataset*) para su posterior análisis. Ante la ausencia de un patrón de referencia para la validación de los datos correspondientes al 2022 recolectados en la UM-UTM, se hizo un análisis de fiabilidad con el modelo alfa de Cronbach (**Yuan *et al.*,** 2003) de las lecturas del sensor UV correspondientes a la IUV, la dosis de UV, y la UV máxima a partir de la Ecuación 3:

$$\alpha = \frac{k}{k-1}\left[1 - \frac{\sum s^2}{s_T{}^2}\right] \quad (3),$$

donde K corresponde al número de ítems en la escala, S^2i a la varianza del ítem i y S^2t a la varianza de las puntuaciones observadas de los individuos.

En el procesamiento de los datos, se tomaron como entrada 15.113 muestras, de las cuales se excluyeron 105 casos de valores ausentes, equivalentes al 0,7 % del total. El resultado de este análisis fue una puntuación alfa de 0,861, considerada como una fiabilidad buena (**Yuan *et al.***, 2003), por lo que la medición obtenida del sensor UV de la UM-UTM se consideró consistente y precisa.

Estimación de casos de melanoma y su PAF

En México la información disponible acerca de la incidencia de melanoma es limitada y se encuentra fragmentada, lo que hace complejo su análisis e interpretación. A pesar de ello, se hizo un análisis a partir de las fuentes, métodos y resultados de la investigación de **Arnold *et al.*** (2018) para cuantificar la PAF (porcentaje de casos de una enfermedad que puede evitarse en la población) en México. Al no existir población que esté exenta de la exposición a la luz solar, no es posible aplicar el enfoque tradicional para cuantificarla, ya que el cálculo de la dosis personal acumulada estaría sujeto a errores, en cambio se puede calcular la diferencia entre la incidencia de melanoma en poblaciones de composición étnica similar "expuestas" y "no expuestas" (**Olsen *et al.***, 2015). Según esto, la PAF para la UVR se calculó por medio de la Ecuación 4:

$$PAF = \frac{I_P - I_u}{I_p} \quad (4),$$

donde I_p corresponde a la incidencia de melanoma en el 2012 en las poblaciones de estudio y I_u a la incidencia en la población de referencia.

Para obtener los valores de la población de referencia I_u, **Parkin *et al.*** (2011) ajustaron un modelo de cohorte retrospectivo con base en los datos de la región sur del Támesis en el Reino Unido, ya que esta es la serie de datos de incidencia de melanoma más extensa y de mayor calidad desde 1960. A partir de este estudio se determinaron las tasas de incidencia estimadas en la cohorte nacida en 1903 como población de referencia.

El número de casos nuevos en el 2012 en México se estimó a partir de la tasa de mortalidad nacional reportada a la OMS, la cual se sometió al modelo de mortalidad-incidencia de los países vecinos que sí cuentan con información oficial sobre el melanoma (modelo de la región Centroamérica). De un total de 611 casos, 233 (38%) se presentaron en el rango de edad de 30-49 años, 243 (40%) en el rango de 50-69, y 133 (22%) en mayores de 70.

Para calcular la PAF es necesario determinar la tasa de incidencia I_p de forma indirecta, según lo planteado por **Boyle & Parking** (1991), expresada como la diferencia proporcional entre la incidencia de casos nuevos estimados y el número esperado de casos. Posteriormente, se utilizaron las tasas de incidencia de la población de referencia, I_u (cohorte del sur del Támesis de 1903), para calcular la PAF de la UVR mediante la Ecuación 4. La estimación de la varianza de la PAF se obtuvo mediante el método delta para calcular intervalos de confianza del 95 %. El resultado para la población mexicana en el 2012 fue de 32,30 %.

La proyección de casos al 2020 se obtuvo de las tendencias reportadas por el Observatorio Global del Cáncer (GLOBOCAN) que, a su vez, se basan en los datos nacionales reportados a la OMS.

El melanoma ocupa la posición 21, con un número de casos de 2.051 (1%) de los 195.499 casos nuevos de los diferentes tipos de cáncer en ese año y repite esa posición para las muertes ocasionadas, 773 (0,86%) de las 90.222 por todos los casos de cáncer (**IARC**, 2017).

Desarrollo de la aplicación móvil con datos de la UM-UTM

La propuesta digital incluye el desarrollo de una aplicación móvil (App) que presenta en tiempo real los valores del IUV obtenidos por la UM-UTM; estos son enviados a los usuarios que hayan instalado la App en su dispositivo móvil. La comunicación y obtención de dichos datos involucran tres procesos claves que se describen a continuación.

Preparación del servidor de datos meteorológicos. El conjunto de datos generados a partir de las mediciones de la UM-UTM debió almacenarse en un servidor que, en la presente propuesta, fue la plataforma Weather Underground, la cual permite el almacenamiento gratuito de los datos de estaciones meteorológicas reales, con el objetivo de brindar pronósticos meteorológicos de todo el mundo. La UM-UTM fue dada de alta satisfactoriamente y con ello se obtuvieron las claves de acceso para enviar de forma continua las lecturas realizadas hacia el servidor.

Administración de la carga de datos. A través del sistema de control web de la UM-UTM (WEATHERLINK), se vinculó esta al servidor de datos Weather Underground con las claves de acceso provistas, estableciendo el envío de datos cada quince minutos.

Construcción de la interfaz de programación de aplicaciones (API). Se emplearon los parámetros de conexión provistos por el servidor de Weather Underground para construir la API de recuperación de datos con la cual se obtienen las lecturas de la UM – UTM. En la **figura 5** se ilustra el proceso que se sigue para la comunicación del sistema de *software* y los contenedores que lo componen (aplicación, almacenamiento de datos y microservicios).

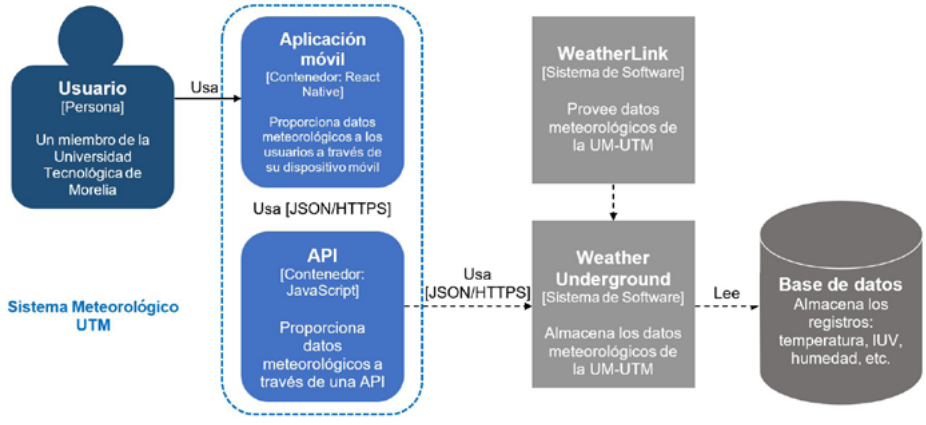


Figura 5. Proceso de comunicación del sistema de *software* y los contenedores

Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
48(186):25-37, enero-marzo de 2024. doi: https://doi.org/10.18257/raccefyn.2190

Resultados y discusión

Una vez que se concluyó que las muestras del *dataset* de la UM-UTM eran fiables, se evaluó el elemento "UV máxima", correspondiente al registro máximo del IUV diario. Los resultados del análisis del *dataset* de la UM-UTM permitieron conocer el comportamiento del IUV en el 2022 (**Figura 6**), siendo el cuatrimestre junio-septiembre el que alcanzó mayores niveles; según las categorías de exposición, el máximo diario permaneció en niveles muy altos y extremadamente altos. Para facilitar la comprensión de lo anotado, se agregaron recuadros con los colores correspondientes a las categorías de exposición (**Tabla 2**). Asimismo, con los datos máximos diarios del IUV, se calculó el promedio anual y se obtuvo un valor de 9,0, en tanto que el cuatrimestre con mayor radiación registró 10,7. Cabe mencionar que no es posible presentar información más extensa sobre los registros de la UVR en la región porque el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) no ofrece los datos sobre la variable en cuestión, y fuera de este organismo público, pocas estaciones con acceso abierto cuentan con el sensor de UVR, o el conjunto de datos es poco extenso en comparación con el que está recopilando la UM-UTM.

La aplicación móvil de la UM - UTM recupera los siguientes datos de la API: fecha de lectura, temperatura, sensación térmica, radiación solar, y humedad e IUV. En la **figura 7** se aprecian las interfaces de la aplicación móvil de la UM – UTM, así como la recomendación que se propone al usuario con el objetivo de reducir su riesgo ante la exposición a la radiación solar para que pueda disfrutar del aire libre de manera segura, recordando siempre que la exposición al sol sin protección aumenta el riesgo de cáncer de piel a lo largo de la vida.

Los efectos en la salud de los rayos UV pueden prevenirse en gran medida con prácticas de protección solar tempranas y constantes, principalmente en la población de personas con piel clara, las cuales están estrechamente vinculadas a las costumbres personales, como la exposición al sol y a su componente ultravioleta (UV), así como a la errónea percepción social de que el bronceado es deseable y saludable. Debido a la falta

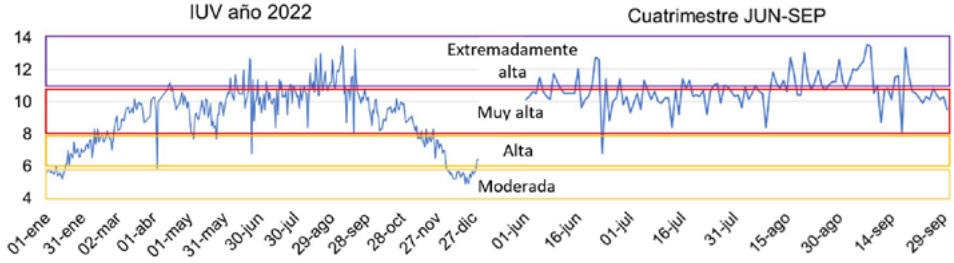


Figura 6. Resultados de la medición del IUV obtenida por la UM-UTM

Figura 7. Aplicación móvil de interpretación de datos de la UM - UTM. **a)** Pantalla de inicio; **b)** ejemplo de IUV de nivel moderado

de acceso a la información de los pacientes con melanoma, atribuida principalmente a la integración de la información nacional en una base de datos común, se recurrió a fuentes indirectas (**IARC**, 2017; **Arnold *et al.***, 2018). Sin embargo, por la metodología empleada, los datos presentados se encuentran en sintonía con los resultados de los estudios de mayor alcance en este campo (**Parkin *et al.***, 2011; **Olsen *et al.***, 2015; **de Vries *et al.***, 2017); aun así, consideramos que esto es una debilidad en este primer estudio.

Conclusiones

Las mediciones obtenidas por la UM-UTM muestran una alta radiación durante gran parte del año, con efectos negativos e irreversibles para la salud de la población si no se toman acciones preventivas. La UVR solar es uno de los componentes ambientales con mayor incidencia en las lesiones de piel, pudiendo ocasionar enfermedades como el melanoma. Los resultados de nuestro estudio permiten concluir que en México uno de cada tres casos de melanoma es causado por la UVR. Nuestra propuesta es ofrecer a la población la posibilidad de reducir el riesgo de contraer dicha enfermedad mediante la difusión del tema en la App desarrollada con el nombre de "Sistema Meteorológico UTM", la cual presenta sugerencias para que el usuario puede protegerse y contrarrestar los efectos y daños que puede causar en la piel la exposición al sol.

Es de vital importancia poner mayor atención a este problema y generar programas educativos en las escuelas que den a conocer los efectos nocivos de la UVR e incentiven cambios en el estilo de vida de la sociedad actual. Los jóvenes deben entender que las enfermedades de la piel pueden causar daños graves irreversibles, pero que es posible cuidar su salud siguiendo las recomendaciones propuestas por la OMS. Los resultados del presente estudio recomiendan que se continúe la investigación de los efectos de la UVR solar a nivel nacional utilizando el Registro Nacional de Cáncer aprobado por la Cámara de Diputados en el 2018. Asimismo, los resultados contribuyen al logro del Objetivo de Desarrollo Sostenible 3 que busca la reducción de la mortalidad prematura mediante la prevención y el fortalecimiento de la capacidad del país en materia de alertas tempranas y de reducción y gestión de riesgos en salud.

Agradecimientos

A la Universidad Tecnológica de Morelia (UTM), por el tiempo y apoyo brindado, así como a los integrantes del Cuerpo Académico de Transferencia Tecnológica para la Construcción de Software (TRATEC) – PRODEP de la UTM por sus comentarios y apoyo.

A la Universidad de Guadalajara (UdeG), por su ayuda en la aplicación de la tecnología y en el soporte del *software* utilizado para el manejo de los datos, así como para la publicación de este documento. Un agradecimiento especial a Liliana Gómez Pizano, investigadora de la Facultad de Enfermería de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) por su aporte a esta investigación.

Contribución de los autores

G L-S, J C-V y L S-S diseñaron el estudio y redactaron el manuscrito; G L-S y J C-V recolectaron e interpretaron los datos; E B-R desarrolló la propuesta tecnológica.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

American Cancer Society. (2023). *Cancer Facts & Figures 2023*. https://www.cancer.org/content/dam/cancer-org/research/cancer-facts-and-statistics/annual-cancer-facts-and-figures/2023/2023-cancer-facts-and-figures.pdf

Arnold, M., de Vries, E., Whiteman, D. C., Jemal, A., Bray, F., Parkin, D. M., Soerjomataram, I. (2018). Global burden of cutaneous melanoma attributable to ultraviolet radiation in 2012. *International Journal of Cancer*, *143* (6), 1305-1314. https://doi.org/10.1002/ijc.31527

Aroste, V. (2017). *Clasificación de los carcinógenos (IARC)* [Imagen]. Material Educativo. https://fullseguridad.net/2017/06/02/listado-agentes-cancerigenos-segun-iarc/

Benavides, H., Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010) *Información técnica sobre la Radiación Ultravioleta, el Índice UV y su pronóstico* (IDEAM–METEO/001-2010). Bogotá, D.C.: IDEAM. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/022454/NotatecnicaIUVPaginaWEBfinal.pdf

Boyle, P. & Parkin, D. M. (1991). Cancer registration: principles and methods. Statistical methods for registries. *IARC Scientific Publications*, (95), 126-158. https://publications.iarc.fr/_publications/media/download/3523/ee33be978ff8031c5613f293298ae01d8347bb33.pdf

Chadyšienė, R., Girgždienė, R., Girgždys, A. (2005). Ultraviolet radiation and ground-level ozone variation in Lithuania. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, *13*(1), 31-36. https://doi.org/10.1080/16486897.2005.9636843

Cracknell, A. P. & Varotsos, C. (2012). *Remote sensing and atmospheric ozone* (p. 35). Springer eBooks. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10334-6

Crutzen, P. J. (1974). Estimates of possible future ozone reductions from continued use of fluoro-chloro-methanes (CF_2CL_2, $CFCL_3$). *Geophysical Research Letters*, *1*(5), 205-208. https://doi.org/10.1029/gl001i005p00205

Dahlback, A. (2002). Recent changes in surface ultraviolet solar radiation and stratospheric ozone at a high Arctic site. *UV Radiation and Arctic Ecosystems*. Springer https://doi.org/10.1007/978-3-642-56075-0_1

de Vries, E., Amador, J. R., Rincón, C., Uribe, C., Parkin, D. M. (2017). Cutaneous melanoma attributable to solar radiation in Cali, Colombia. *International Journal of Cancer*, *140* (9), 2070-2074. https://doi.org/10.1002/ijc.30638

Delic, N. C., Lyons, J. G., Di Girolamo, N., Halliday, G. M. (2017). Damaging Effects of Ultraviolet Radiation on the Cornea. *Photochemistry and photobiology*, *93*(4), 920-929. https://doi.org/10.1111/php.12686

Duro, E., Campillos, M. T., Causín, S. (2003). El sol y los filtros solares. *Medifam*, *13*(3). https://doi.org/10.4321/s1131-57682003000300005

Gómez, H. (2021). Carga de la enfermedad. J. Rivera, T. Barrientos y C. Oropeza (Eds.). *Síntesis sobre políticas de salud. Propuestas basadas en evidencia* (203-209). Instituto Nacional de Salud Pública. https://www.insp.mx/resources/images/stories/2022/docs/220118_Sintesis_sobre_politicas_de_salud.pdf

Hartmann, D. L. (2015). *Global Physical Climatology* (2.ª Ed., pp. 49-94). Elsevier Science. ISBN: 9780123285317.

He, H., Fioletov, V., Tarasick, D. W., Mathews, T. W., Long, C. S. (2013). Validation of Environment Canada and NOAA UV Index forecasts with Brewer measurements from Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *52*(6), 1477-1489. https://doi.org/10.1175/jamc-d-12-0286.1

Hernández, D. A., Aldaco, F., Cervantes, G., Erazo, A. A., Pérez, P., Torrecillas, L., Díaz, G. (2019). La mortalidad por melanoma en México aumenta. *Revista de Especialidades Médico-Quirúrgicas, 23* (3), 123-129.

IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. (2013). *Non-ionizing radiation, Part 2: Radiofrequency electromagnetic fields*. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, 102(Pt 2), 1-460. https://publications.iarc.fr/_publications/media/download/3143/6464cac7e8eca3fa20f11d4d134613e4870158c5.pdf

International Agency for Research on Cancer. (2012). *Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, No. 100D*. IARC. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK304362/

International Agency for Research on Cancer. (2017). *GLOBOCAN 2012: Estimated cancer incidence, mortality and prevalence Worldwide in 2012 v1.0*. IARC; 2013. https://publications.iarc.fr/Databases/Iarc-Cancerbases/GLOBOCAN-2012-Estimated-Cancer-Incidence-Mortality-And-Prevalence-Worldwide-In-2012-V1.0-2012

Islami, F., Sauer, A. G., Miller, K. D., Fedewa, S. A., Minihan, A. K., Geller, A. C., Lichtenfeld, J. L., Jemal, A. (2020). Cutaneous melanomas attributable to ultraviolet radiation exposure by state. *International Journal of Cancer*, *147*(5), 1385-1390. https://doi.org/10.1002/ijc.32921

Juszczak, A. M., Wölfle, U., Končić, M. Z., Tomczyk, M. (2022). Skin cancer, including related pathways and therapy and the role of luteolin derivatives as potential therapeutics. *Medicinal Research Reviews*, *42*(4), 1423-1462. https://doi.org/10.1002/med.21880

Khotari, C. R. (2004). *Research Methodology: Methods and Techniques* (2.ª ed., pp. 2-4). New Age International. Ltd.

Lucas, R., Norval, M., Neale, R. E., Young, A. R., De Gruijl, F. R., Takizawa, Y., Van Der Leun, J. C. (2014). The consequences for human health of stratospheric ozone depletion in association with other environmental factors. *Photochemical and Photobiological Sciences*, *14* (1), 53-87. https://doi.org/10.1039/c4pp90033b

Mansouri, B., Housewright, C. D. (2017). The Treatment of Actinic Keratoses—The rule rather than the exception. *JAMA Dermatology*, *153*(11), 1200. https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2017.3395

Molina, M. J. & Rowland, F. S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, *249*(5460), 810-812. https://doi.org/10.1038/249810a0

Olsen, C. M., Wilson, L. F., Green, A. C., Bain, C., Fritschi, L., Neale, R. E., Whiteman, D. C. (2015). Cancers in Australia attributable to exposure to solar ultraviolet radiation and prevented by regular sunscreen use. *Australian and New Zealand journal of public health*, *39* (5), 471-476. https://doi.org/10.1111/1753-6405.12470

Organización Internacional de Normalización. (1999). *Erythema reference action spectrum and standard erythema dose* (ISO 17166:1999). https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:17166:ed-1:v2:en

Parkin, D. M., Mesher, D., Sasieni, P. (2011). 13. Cancers attributable to solar (ultraviolet) radiation exposure in the UK in 2010. *British Journal of Cancer*, *105*(S2), S66-S69. https://doi.org/10.1038/bjc.2011.486

Peixoto, J. & Oort, A. (1992). *Physics of climate.* American Institute of Physics. https://link.springer.com/book/9780883187128

Porta, M. (2008). A Dictionary of Epidemiology. *Revista Española De Salud Pública*, *82*(4). https://doi.org/10.1590/s1135-57272008000400008

Robinson, P. J. & Henderson-Sellers, A. (2014). *Contemporary climatology* (2.ª ed., p.18). *Routledge eBooks*. https://doi.org/10.4324/9781315842660.

Rogers, H. W., Weinstock, M. A., Feldman, S. R., Coldiron, B. M. (2015). Incidence Estimate of Nonmelanoma Skin Cancer (Keratinocyte Carcinomas) in the U.S. Population, 2012. *JAMA dermatology*, *151*(10), 1081-1086. https://doi.org/10.1001/jamadermatol.2015.1187

Secretaría de Salud. (2015). *Cáncer de piel duplica su incidencia cada 10 años*. gob.mx. https://www.gob.mx/salud/prensa/cancer-de-piel-duplica-su-incidencia-cada-10-anos

Solomon, S. (1999). Stratospheric Ozone Depletion: A review of Concepts and history. *Reviews of Geophysics*, *37*(3), 275-316. https://doi.org/10.1029/1999rg900008

World Health Organization, United Nations Environment Programme & International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. (2002). Índice UV Solar mundial: Guía práctica. https://apps.who.int/iris/handle/10665/42633

World Health Organization. (2020). *Cancer Mexico 2020 country profile*. https://www.who.int/publications/m/item/cancer-mex-2020

World Meteorological Organization. (2022). *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022* (Número de informe 278). https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2022/downloads/executivesummary.pdf

Yuan, K., Guarnaccia, C. A., Hayslip, B. (2003). A study of the distribution of sample coefficient Alpha with the Hopkins symptom checklist: Bootstrap versus Asymptotics. *Educational and Psychological Measurement*, *63*(1), 5-23. https://doi.org/10.1177/0013164402239314